

ΥΠΟΕΡΓΟ Β

Δράση Β1

B1.5. Προσομοίωση των υπόγειων υδάτων στο Νομό Ροδόπης
με τη χρήση του συστήματος FEFLOW

B1.5. Simulation of groundwater in the Prefecture of Rodopi using FEFLOW

**ΠΒ1.10 Ποσοτική ανάλυση των πιέσεων που ασκούνται από τις
αρδεύσεις στα υπόγεια ύδατα του Νομού Ροδόπης:**

διακύμανση της υπόγειας στάθμης και διείσδυση θαλασσινού νερού

**DB1.10 Quantitative analysis of the pressures exerted from
irrigation on groundwater in the Prefecture of Rodopi:**
groundwater level fluctuation and seawater intrusion



Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε από το Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ) στο πλαίσιο της Δράσης Β1 του έργου «Προστασία και Ανόρθωση Υδατικών και Δασικών Πόρων Νομού Ροδόπης», που υλοποιείται από την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, με τη συνεργασία του Περιφερειακού Ταμείου Ανάπτυξης Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, του Φορέα Διαχείρισης Δέλτα Νέστου – Βιστωνίδας - Ισμαρίδας και του Ελληνικού Κέντρου Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). Το έργο χρηματοδοτείται σε ποσοστό 50% από το Χρηματοδοτικό Μέσο Χωρών του Ενιαίου Οικονομικού Χώρου 2004 - 2009 και σε ποσοστό 50% από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων (ΠΔΕ) (εθνικούς πόρους).

The present study has been prepared by the Greek Biotope/Wetland Centre in the framework of Action B1 of the project "Protection and Rehabilitation of water and forest resources of the Prefecture of Rodopi", which is implemented by The Region of East Macedonia - Thrace (REMTH) in collaboration with The Regional Development Fund of East Macedonia – Thrace, The Management Body of the Delta of Nestos – Vistonida - Ismarida, and The Goulandris Natural History Museum / Greek Biotope-Wetland Centre (ΕΚΒΥ). It is co-financed by 50% from the EEA Financial Mechanism for the period 2004 – 2009 and by 50% from the Public Investments Program (national funds).

Η προτεινόμενη αναφορά της παρούσας έκθεσης είναι:

Δουλγέρης Χαράλαμπος, 2012. Ποσοτική ανάλυση των πιέσεων που ασκούνται από τις αρδεύσεις στα υπόγεια ύδατα του Νομού Ροδόπης: διακύμανση της υπόγειας στάθμης και διείσδυση θαλασσινού νερού. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). Θέρμη. 19 σελ.

This document may be cited as follows:

Doulgeris Charalampos, 2012. Quantitative analysis of the pressures exerted from irrigation on groundwater in the Prefecture of Rodopi: groundwater level fluctuation and seawater intrusion. Greek Biotope-Wetland Centre. Thermi, Greece 19 p.

ΠΒ1.10 Ποσοτική ανάλυση των πιέσεων που ασκούνται από τις αρδεύσεις στα υπόγεια ύδατα του Νομού Ροδόπης: διακύμανση της υπόγειας στάθμης και διείσδυση θαλασσινού νερού

ΤΙΤΛΟΣ / TITLE	ΠΒ1.10 Ποσοτική ανάλυση των πιέσεων που ασκούνται από τις αρδεύσεις στα υπόγεια ύδατα του Νομού Ροδόπης: διακύμανση της υπόγειας στάθμης και διείσδυση θαλασσινού νερού / DB1.10 Quantitative analysis of the pressures exerted from irrigation on groundwater in the Prefecture of Rodopi: groundwater level fluctuation and seawater intrusion
ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ / EDITOR	Χαράλαμπος Δουλγέρης, ΕΚΒΥ / Charalampos Doulgeris, ΕΚΒΥ
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ / DATE	Ιούνιος 2012 / June 2012
ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ / IDENTIFIER	DB1_10_QuantitativeAnalysis_GW.doc
ΓΛΩΣΣΑ / LANGUAGE	Ελ / El

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Α. Αποστολάκης

Χ. Δουλγέρης

Σωτηρία Κατσαβούνη

Δ. Παπαδήμος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
----------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ	3
--------------------------------------------------------------------------------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ ΣΤΟ FEFLOW	9
--------------------------------------------------------------------------------------------------	---

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ	18
-----------------------------------------------------	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Θέσεις των σημείων παρακολούθησης των αποτελεσμάτων του ομοιώματος (μπλε σημεία), των φρεατίων στα οποία σταμάτησε η άντληση (κίτρινα σημεία) και των φρεατίων επαναπλήρωσης (πράσινα σημεία) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης	11
Σχήμα 2. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 1)	11
Σχήμα 3. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 2)	12
Σχήμα 4. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 3)	12
Σχήμα 5. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 4)	13
Σχήμα 6. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 5)	13
Σχήμα 7. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 6)	14
Σχήμα 8. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 13)	14
Σχήμα 9. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 14)	15
Σχήμα 10. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 15)	15

Σχήμα 11. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 1).....	16
Σχήμα 12. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 13).....	16
Σχήμα 13. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 14).....	17
Σχήμα 14. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 15).....	17

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του Ν. Ροδόπης.....	3
Χάρτης 2. Όρια υδρογεωλογικών λεκανών στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης.....	4

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα, κατά την εναρμόνισή της με την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/EK για τα Νερά, θα πρέπει να υλοποιήσει ένα σύνολο δράσεων και ενεργειών, ώστε να επιτευχθεί καλή ποιότητα του υπόγειου και επιφανειακού υδατικού δυναμικού και επί πλέον να εμποδίσει την υποβάθμιση των υδατικών συστημάτων, των οποίων η κατάσταση χαρακτηρίζεται ήδη ως καλή.

Η Οδηγία δημιουργεί το πλαίσιο για τη διατήρηση και προστασία της ποσότητας και ποιότητας όλων των υδατικών οικοσυστημάτων, μέσω του οποίου:

- αποτρέπεται η περαιτέρω υποβάθμιση, και προστατεύεται και βελτιώνεται η κατάσταση όλων των υδατικών πόρων,
- προωθείται η βιώσιμη διαχείριση των υδάτων, μέσω της μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδατικών πόρων,
- ενισχύεται η προστασία του υδατικού περιβάλλοντος με την εφαρμογή μέτρων για τη μείωση της απόρριψης ρυπαντικών ουσιών και την εξάλειψη της απόρριψης τοξικών ρυπαντών με βάση κατάλογο προτεραιότητας,
- διασφαλίζεται η προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων,
- επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση των επιπτώσεων ακραίων φαινομένων, πλημμύρων και ξηρασίας.

Η ρύπανση των υδάτων με νιτρικά προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και αποτελεί ένα από τα προβλήματα αιχμής για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές, με την υπεράντληση του υπόγειου νερού, η υφαλμύριση λόγω της διείσδυσης του θαλασσινού νερού καταλήγει να είναι το μείζον πρόβλημα της ποιότητας των υπόγειων νερών.

Τα μαθηματικά ομοιώματα υδρολογικής προσομοίωσης είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων και με τη βοήθεια τέτοιων ομοιωμάτων είναι δυνατή η ποσοτική περιγραφή και πρόβλεψη των προβλημάτων έλλειψης νερού και υποβάθμισης της ποιότητάς τους. Επιπλέον, με την εφαρμογή των ομοιωμάτων μπορεί να γίνει έλεγχος και αξιολόγηση των μέτρων/ενεργειών για την διατήρηση ή την αποκατάσταση ενός υδατικού οικοσυστήματος, και στην περίπτωση που συνδυάζεται με μετρήσεις πεδίου, αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη και οικονομική μέθοδο για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Στο πλαίσιο του παρόντος, ελέγχονται μία σειρά από μέτρα/ενέργειες με σκοπό την ανάλυση και τον μετριασμό των πιέσεων που ασκούνται στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης από τις αρδεύσεις. Ο έλεγχος των μέτρων γίνεται με το σύστημα προσομοίωσης FEFLOW, στο περιβάλλον του οποίου αναπτύχθηκε το ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (βλέπε και Παραδοτέο DB1.9). Τα μέτρα/ενέργειες στοχεύουν στην αντιστροφή της πτώσης της υπόγειας στάθμης και στην υποχώρηση του μετώπου διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

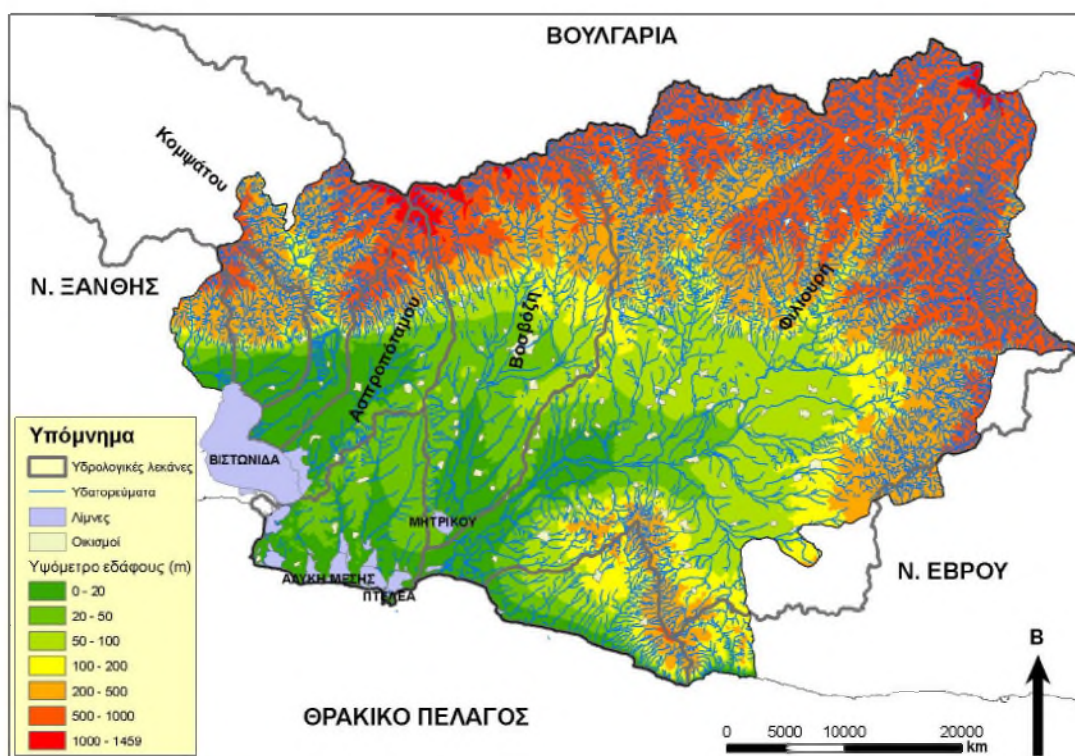
Η έκθεση αποτελείται από δύο κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται η περιγραφή των μέτρων/ενεργειών για την προστασία των υπόγειων υδάτων και στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση των σεναρίων για την εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων αποκατάστασης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

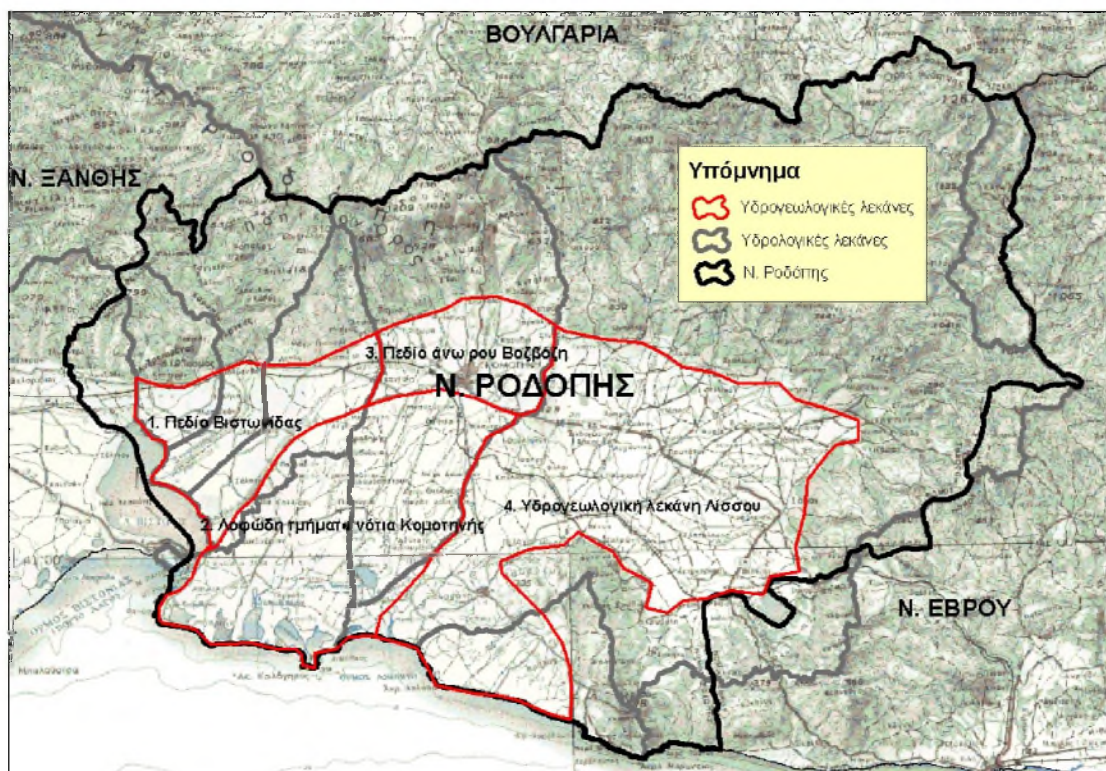
ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ

Ο Νομός Ροδόπης (Χάρτης 1) εμφανίζει ιδιαίτερα πλούσιο υπόγειο υδατικό δυναμικό και εξυπηρετεί το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατικών αναγκών για την ύδρευση και την άρδευση. Παράλληλα, τα υπόγεια νερά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαίτα των επιφανειακών υδάτων και κατ' επέκταση των οργανισμών που συμβιώνουν με αυτά. Οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται στο πεδινό και λοφώδες τμήμα του νομού και ταξινομούνται στις ακόλουθες κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες (Χάρτης 2):

- Το πεδίο της Βιστωνίδας
- Τα λοφώδη τμήματα νότια Κομοτηνής (κύριο λοφώδες τμήμα)
- Πεδίο άνω ρου των χειμάρρων Βοσβόζη, Καρυδιάς, τρελοχειμάρρου
- Υδρογεωλογική λεκάνη κλάδων π. Λίσσου (χαμηλό τμήμα)



Χάρτης 1. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του Ν. Ροδόπης



Χάρτης 2. Όρια υδρογεωλογικών λεκανών στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης

Το ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (βλέπε και Παραδοτέο DB1.9) με τις επικρατούσες υδρολογικές συνθήκες και ανάγκες σε νερό εφαρμόστηκε για μια περίοδο τριάντα ετών (1981-2011), και κατέδειξε τα εξής προβλήματα.

- Η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου από τις αντλήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών είναι σε αρκετές περιοχές ιδιαίτερα μεγάλη και οι μεγαλύτερες πιέσεις ασκούνται στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής. Συγκεκριμένα, στο πεδίο της Πόρπης το πιεζομετρικό φορτίο την περίοδο των αντλήσεων προσεγγίζει τα -40 m, ενώ σημαντική πτώση του φορτίου παρατηρείται και στην περιοχή του Ν. Σιδηροχωρίου. Στο πεδίο της Βιστωνίδας το φορτίο διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα και η υπόγεια στάθμη επανέρχεται σε κανονικά επίπεδα μετά το τέλος της περιόδου των αντλήσεων. Ο υποβιβασμός της υπόγειας στάθμης είναι επίσης αισθητός και σε περιοχές του νότιου τμήματος της υδρογεωλογικής λεκάνης του Λίσσου.
- Η διείσδυση του θαλασσινού νερού στο γλυκό νερό των υδροφορέων σχηματίζει ένα μέτωπο αλατότητας του οποίου η προέλαση εντοπίζεται σε μια απόσταση 7 km περίπου από την ακτογραμμή στην ευρύτερη περιοχή της λ. Ισμαρίδας και της

εκβολής του π. Φιλιουρή, και μεγαλύτερη των 3 km στην περιοχή νοτιοανατολικά της λ. Βιστωνίδας (περιοχή Γλυκονερίου).

- Η συγκέντρωση των νιτρικών είναι αυξημένη στον νοητό άξονα μεταξύ Κομοτηνής και Ισμαρίδας, σε τμήμα της περιοχής που εντοπίζεται μεταξύ Ισμαρίδας και Ξυλαγανής, ενώ στο πεδίο της Βιστωνίδας εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές οι οποίες ξεπερνούν τα 40 mg/l.

Η βέλτιστη αξιοποίηση, αποκατάσταση και διαχείριση του υπόγειου νερού των υδροφόρων στρωμάτων του Ν. Ροδόπης προϋποθέτει τη λήψη άμεσων μέτρων για την ανόρθωση της υπόγειας στάθμης και τη παρεμπόδιση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού σε αυτούς. Η αντιμετώπιση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού και η αποκατάσταση ενός υδροφορέα είναι συνήθως μια διαδικασία αργή, η οποία μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια. Η αποκατάσταση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να ξεκινά πρωτίστως από την προστασία αυτών με συνεχή παρακολούθηση της αλατότητας των νερών τους, καθώς και την εφαρμογή διαφόρων ενεργειών, πριν η διείσδυση του θαλασσινού νερού επεκταθεί σημαντικά στον υδροφορέα και το φαινόμενο γίνει πολύ δύσκολο, ή και πρακτικά αδύνατο, να αντιστραφεί.

Τα μέτρα/ενέργειες που μπορούν να ληφθούν με σκοπό την ανόρθωση της υπόγειας στάθμης σχετίζονται με τη μείωση των αντλήσεων και την ανακατανομή των θέσεων άντλησης, την αύξηση της φυσικής επαναπλήρωσης και την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού. Ειδικότερα, και επιπλέον των προηγούμενων μέτρων, για την προστασία ή την αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων από τη θάλασσα διείσδυση μπορεί να εφαρμοσθεί είτε άντληση του υπόγειου αλμυρού νερού είτε κατασκευή υπόγειου φράγματος μεταξύ των υπόγειων υδροφορέων και της θάλασσας. Πιο αναλυτικά, στα μέτρα αυτά περιλαμβάνονται:

- Η μείωση των αντλήσεων προϋποθέτει, είτε την εύρεση άλλων πηγών νερού για την κάλυψη της ζήτησης, είτε τη μείωση της ζήτησης του νερού, με την εφαρμογή ορισμένων ενεργειών, όπως η ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των χρηστών του νερού, η μείωση των απωλειών των συστημάτων μεταφοράς και διάθεσης του νερού, η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του νερού κατά τη βιομηχανική γραμμή παραγωγής, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για συγκεκριμένους σκοπούς (π.χ. ψύξη, άρδευση, επαναπλήρωση υδροφορέων) και η μείωση του αρδευτικού νερού με αλλαγή των καλλιεργειών αλλά και των

μεθόδων άρδευσης. Σε αρκετές περιπτώσεις πάντως, η υλοποίηση όλων των παραπάνω ενεργειών, οι οποίες σχετίζονται με την ορθολογική χρήση του νερού, είναι μια αρκετά δύσκολη υπόθεση, ιδιαίτερα εάν πρέπει να εφαρμοσθούν σε μεγάλη κλίμακα.

- Η ανακατανομή των θέσεων άντλησης σχετίζεται με την άντληση των ίδιων ποσοτήτων νερού αλλά και την ταυτόχρονη μείωση του γλυκού νερού που εκρέει προς τη θάλασσα, χωρίς όμως να ευνοείται η περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού. Ο van Dam (1999) αναφέρει ότι είναι προτιμότερο οι αντλήσεις να γίνονται μακριά παρά κοντά στη θάλασσα. Επιπλέον, ένας μεγαλύτερος αριθμός φρεατίων μικρής δυναμικότητας είναι προτιμότερος από λιγότερα φρεάτια υψηλότερης δυναμικότητας, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το πάχος του γλυκού νερού είναι μικρό.
- Η αύξηση της φυσικής επαναπλήρωσης μπορεί να επιτευχθεί με την παρεμπόδιση ή και απόφραξη της ροής σε επιφανειακά νερά, αυξάνοντας έτσι το βάθος του νερού και το χρόνο της διήθησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις και όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν μπορεί να γίνει και εκτροπή προς γειτονικές περιοχές με μεγαλύτερη διηθητικότητα. Η φυσική επαναπλήρωση μπορεί επίσης να αυξηθεί και με ενέργειες που κυρίως συνδέονται με την προστασία από τη διάβρωση του εδάφους, όπως το όργωμα κατά τις ισοϋψείς και η δημιουργία αναβαθμίδων σε επικλινείς κυρίως περιοχές.
- Η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μπορεί να γίνει είτε από την επιφάνεια του εδάφους με τη δημιουργία λεκανών κατάκλυσης είτε με την εγκατάσταση φρεατίων εμπλουτισμού. Για τον εμπλουτισμό ελεύθερων υδροφόρων στρωμάτων και οι δύο τεχνικές μπορούν να εφαρμοσθούν ενώ σε κλειστούς υπό πίεση και ημίκλειστους υδροφορείς που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος η επιλογή των φρεατίων εμπλουτισμού είναι η καλύτερη λύση. Για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού απαιτείται καταρχήν η εύρεση των αναγκαίων ποσοτήτων νερού. Το νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακά νερά της περιοχής ή από αντλήσεις υπόγειου νερού το οποίο αρχικά χρησιμοποιείται για άλλο σκοπό και στη συνέχεια μετά από κατάλληλη επεξεργασία χρησιμοποιείται για τον τεχνητό εμπλουτισμό.
- Η άντληση αλμυρού νερού μπορεί να γίνει με μια σειρά γεωτρήσεων κατάλληλα διατεταγμένων κατά μήκος της ακτής και ανάμεσα στις παραγωγικές γεωτρήσεις

και τη διαδρομή που ακολουθεί το αλμυρό νερό της θάλασσας. Η άντληση του αλμυρού νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου του αλμυρού νερού στον υδροφορέα και κατ' επέκταση την αύξηση του όγκου του γλυκού νερού. Η διάθεση του αλμυρού νερού είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη ή για αφαλάτωση.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά φρεάτια από τα οποία γίνεται ταυτόχρονη άντληση γλυκού και αλμυρού νερού (scavenger wells), με σκοπό να εξαχθούν λεπτοί φακοί γλυκού νερού οι οποίοι βρίσκονται πάνω από αλμυρό νερό. Τα φρεάτια αυτά έχουν φίλτρα και στη ζώνη του γλυκού και στη ζώνη του αλμυρού νερού. Το σύστημα ταυτόχρονης άντλησης γλυκού και αλμυρού νερού μπορεί να αποτελείται είτε από δύο γειτονικά φρεάτια είτε από ένα φρεάτιο με δύο αντλίες. Η λειτουργία αυτών των φρεατίων στηρίζεται στο γεγονός ότι ο ανορθούμενος κώνος αλμυρού νερού που προκύπτει ως αποτέλεσμα της άντλησης του γλυκού νερού υποβιβάζεται με την άντληση του αλμυρού νερού.

- Η κατασκευή υπόγειου φράγματος που διακόπτει, ή μειώνει σε μεγάλο βαθμό, την υδραυλική επικοινωνία των υπόγειων υδροφορέων με τη θάλασσα είναι μια επιπλέον τεχνική που μπορεί να εφαρμοσθεί για την προστασία των υπόγειων υδροφορέων από τη θαλάσσια διείσδυση. Ωστόσο, οι υδροφορείς συνήθως έχουν, είτε μεγάλο πλάτος, είτε μεγάλο βάθος, οπότε η τεχνική αυτή μπορεί να είναι αρκετά δύσκολη στην εφαρμογή της και με μεγάλο κόστος.

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε μια συνοπτική παρουσίαση των τεχνικών, για την ανόρθωση της υπόγειας στάθμης και την αντιμετώπιση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Η χρησιμοποίηση όμως των μεθόδων αυτών στην πράξη μπορεί, πολλές φορές, να μην είναι εφικτή ή οικονομικά συμφέρουσα. Η παρακολούθηση της ποιότητας του υπόγειου νερού και η λήψη μέτρων πριν εμφανισθεί σε μεγάλη έκταση το πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης είναι οι καλύτερες τεχνικές για την προστασία των παράκτιων υδροφορέων.

Για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης και την εφαρμογή των μεθόδων που προαναφέρθηκαν απαιτείται αφενός καλή γνώση της επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας μιας περιοχής και αφετέρου ένα αποτελεσματικό και εναλλακτικό σχέδιο διαχείρισης. Η αποτελεσματικότητα όμως των μεθόδων πριν αυτές εφαρμοσθούν στην πράξη πρέπει να ελεγχθεί με μαθηματικά ομοιώματα

προσομοίωσης της δυναμικής κατάστασης και της ποιότητας του νερού. Η εφαρμογή των ομοιωμάτων, σε συνδυασμό με μετρήσεις πεδίου αλλά και εμπειρία εφαρμογής των μεθόδων, αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη και οικονομική μέθοδο αντιμετώπισης του προβλήματος, είτε αυτό αφορά τη διατήρηση είτε την αποκατάσταση του υδροφόρου συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ ΣΤΟ FEFLOW

Τα μέτρα αποκατάστασης του υπόγειου υδροφόρου συστήματος που προτείνονται στο πλαίσιο του παρόντος, στοχεύουν στην ανόρθωση της υπόγειας στάθμης και στην υποχώρηση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Για τον έλεγχο της αποδοτικότητας των προτεινόμενων μέτρων υιοθετήθηκαν τα εξής σενάρια:

ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Υποθέτουμε ότι η άντληση από τους υπόγειους υδροφορείς στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής και στην υδρογεωλογική λεκάνη του Λίσσου μειώνεται κατά 15%. Η μείωση των αντλήσεων εφαρμόζεται με τη διακοπή της λειτουργίας παράκτιων φρεατίων άντλησης (βλέπε και Σχήμα 1), με σκοπό εκτός από την ανόρθωση της υπόγειας στάθμης να ελεγχθεί και η δυνατότητα περιορισμού της διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Υποθέτουμε ότι εφαρμόζεται επαναπλήρωση των υπόγειων υδροφορέων με την ενεργοποίηση 10 φρεατίων επαναπλήρωσης (βλέπε και Σχήμα 1), τα οποία τροφοδοτούν με νερό καλής ποιότητας τους υπόγειους υδροφορείς. Τα φρεάτια επαναπλήρωσης έχουν συνεχή λειτουργία με σταθερή παροχή επαναπλήρωσης $41,66 \text{ m}^3/\text{hr}$ και εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή νότια της λ. Ισμαρίδας κατά μήκος ενός άξονα παράλληλου με την ακτογραμμή και στην περιοχή νοτιοανατολικά της λ. Βιστωνίδας (περιοχή Γλυκονερίου). Η ενεργοποίηση των φρεατίων επαναπλήρωσης αποσκοπεί κυρίως στην εκτόπιση του αλμυρού νερού από τον υδροφορέα αλλά και στην ανόρθωση της υπόγειας στάθμης. Τα μέτρα του σεναρίου αυτού εφαρμόζονται προσθετικά στα μέτρα του προηγούμενου σεναρίου, στο οποίο υιοθετήθηκε η μείωση των αντλήσεων κατά 15%.

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μέτρων των ΣΕΝΑΡΙΩΝ 1 και 2, εκτελέστηκε το ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης στο περιβάλλον του FEFLOW (βλέπε και Παραδοτέο DB1.9) για μια περίοδο πέντε ετών. Επίσης, το ομοίωμα εκτελέστηκε για την ίδια περίοδο θεωρώντας ότι κανένα από τα παραπάνω μέτρα δεν υιοθετείται και ως εκ τούτου δεν αλλάζουν οι πρακτικές που εφαρμόζονται για τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων (ΣΕΝΑΡΙΟ 0).

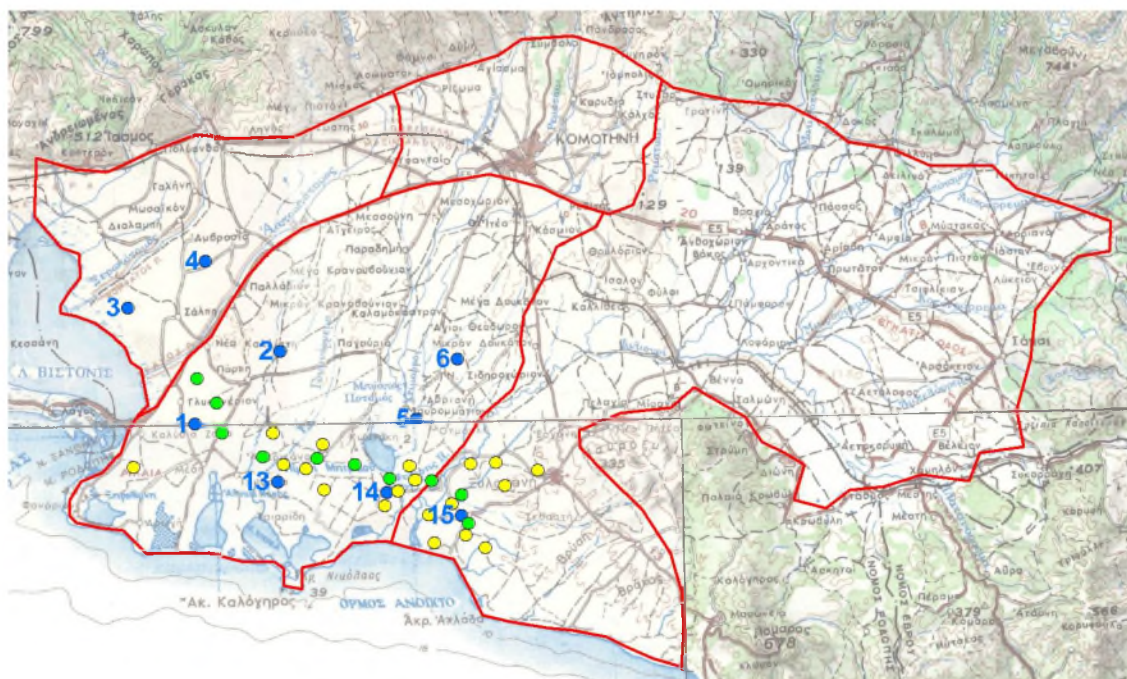
Ως αρχική τιμή της κατανομής του πιεζομετρικού φορτίου και της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υδροφόρα στρώματα

χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες κατανομές που προσομοιώθηκαν τον Ιανουάριο του 2012 (Παραδοτέο DB1.9) και για τρία σενάρια.

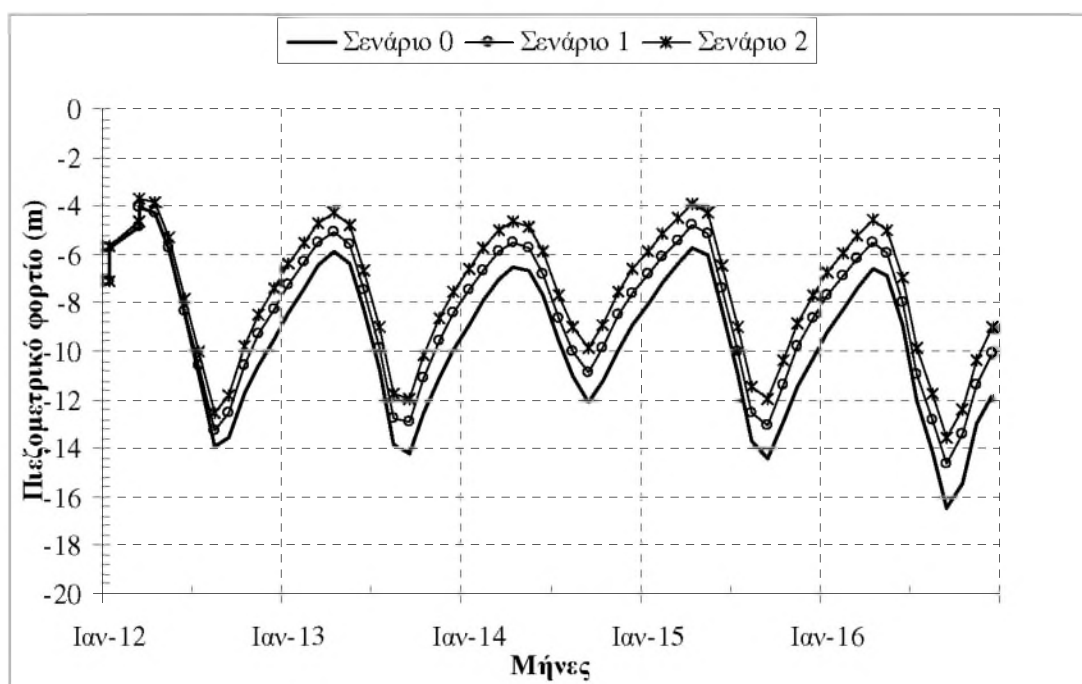
Οι θέσεις των σημείων παρακολούθησης των αποτελεσμάτων του ομοιώματος (πιεζομετρικό φορτίο και συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης δίνονται στο Σχήμα 1. Η διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία αυτά για τα τρία σενάρια που προσομοιώθηκαν δίνεται στα Σχήματα 2 έως 10. Στο πεδίο της Πόρπης (Σχήματα 2, 3 και 13), η μείωση των αντλήσεων (Σενάριο 1) και η ενεργοποίηση φρεατίων επαναπλήρωσης σε συνδυασμό με τη μείωση των αντλήσεων (Σενάριο 2) είχαν ως αποτέλεσμα την ανύψωση του πιεζομετρικού φορτίου κατά 2 έως 4 μέτρα, ιδιαίτερα κατά την περίοδο υψηλής υπόγειας στάθμης (Απρίλιος). Η αντιστροφή της πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου, και κατ' επέκταση της υπόγειας στάθμης, γίνεται περισσότερο αισθητή στην περιοχή του Ν. Σιδηροχωρίου (Σχήματα 6 και 7) και στις περιοχές νότια και νοτιοανατολικά της λ. Ισμαρίδας (Σχήματα 9 και 10). Τα σενάρια που εξετάστηκαν δεν είχαν καμία επίδραση στο πιεζομετρικό φορτίο του πεδίου της Βιστωνίδας (Σχήματα 4 και 5), όπως άλλωστε αναμενόταν λόγω της μεγάλης απόστασης από την περιοχή που εφαρμόζονται τα μέτρα των σεναρίων.

Στα Σχήματα 11 έως 14 δίνεται η διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων μειώνεται αισθητά σε όλα τα σημεία παρακολούθησης αλλά σε καμία περίπτωση δεν ανακόπτεται η προώθηση του μετώπου των αλάτων.

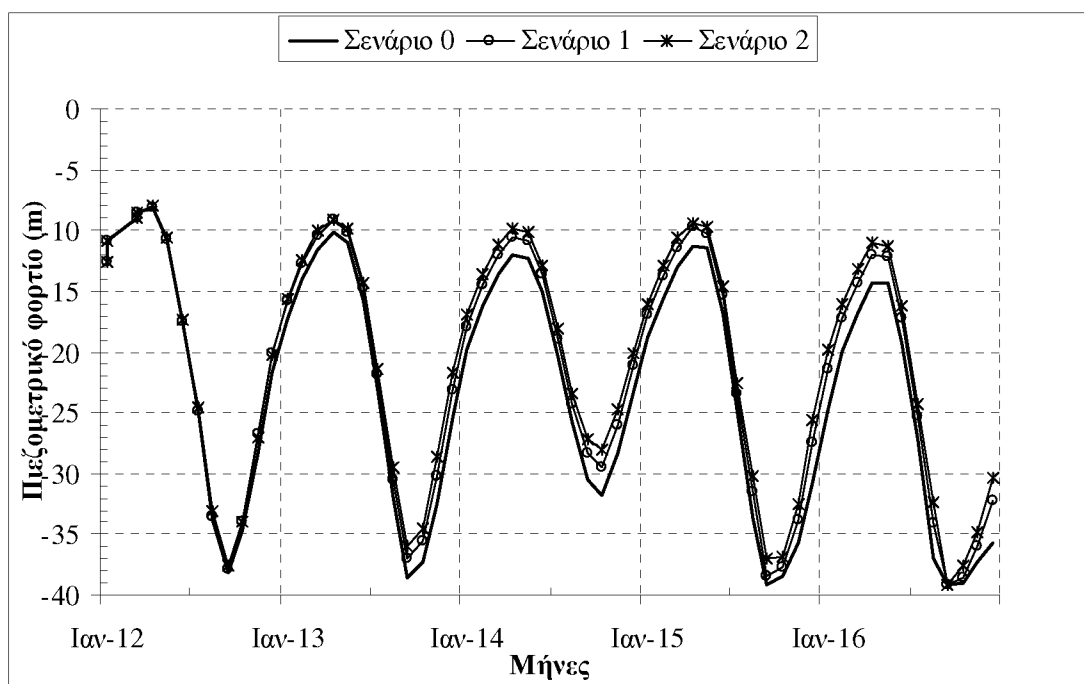
Τα μέτρα που εφαρμόζονται στα Σενάρια 1 και 2 έχουν ως αποτέλεσμα την ανόρθωση της υπόγειας στάθμης και την επαναφορά της στα επίπεδα πριν την έναρξη των αντλήσεων, επιτυγχάνοντας έτσι την αειφορική διαχείριση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων. Αντιθέτως, τα μέτρα των σεναρίων δεν επαρκούν για την υποχώρηση της διείδυσης του θαλασσινού νερού και κρίνεται σκόπιμο να ληφθούν επιπρόσθετα μέτρα είτε μείωσης των αντλήσεων είτε αύξησης της επαναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων.



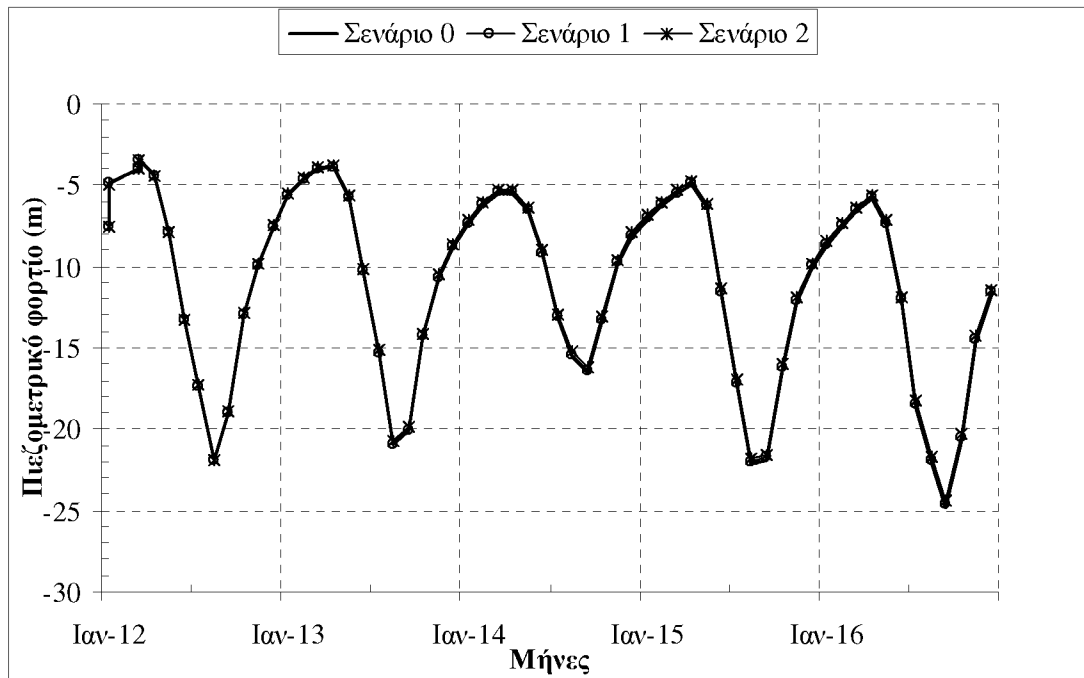
Σχήμα 1. Θέσεις των σημείων παρακολούθησης των αποτελεσμάτων του ομοιώματος (μπλε σημεία), των φρεατίων στα οποία σταμάτησε η άντληση (κίτρινα σημεία) και των φρεατίων επαναπλήρωσης (πράσινα σημεία) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης



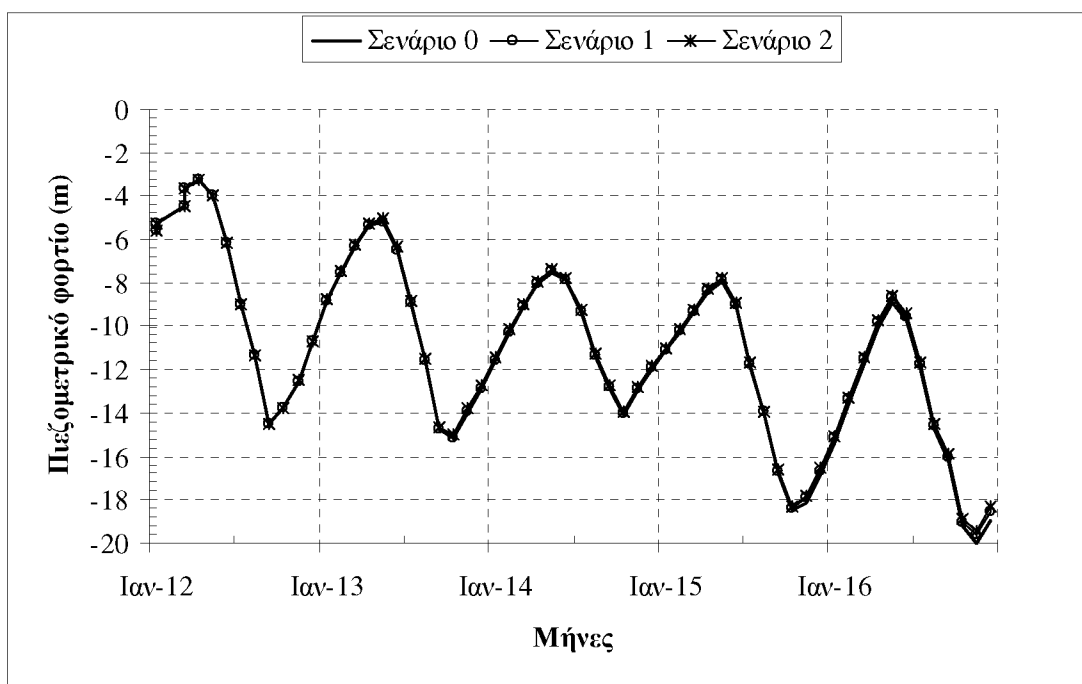
Σχήμα 2. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 1)



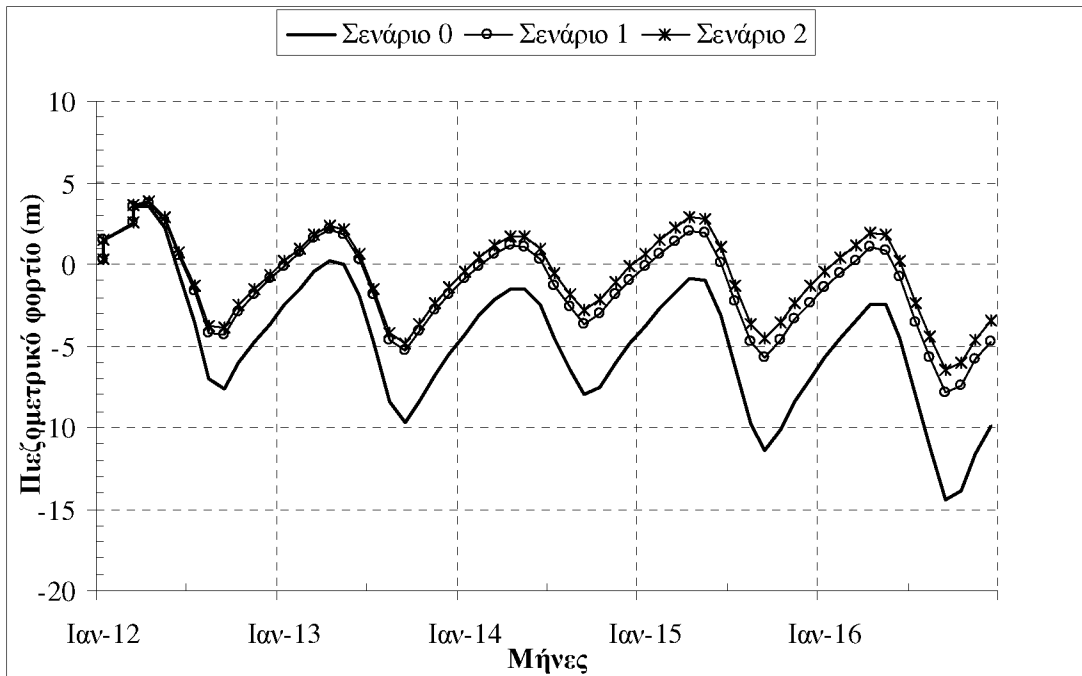
Σχήμα 3. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 2)



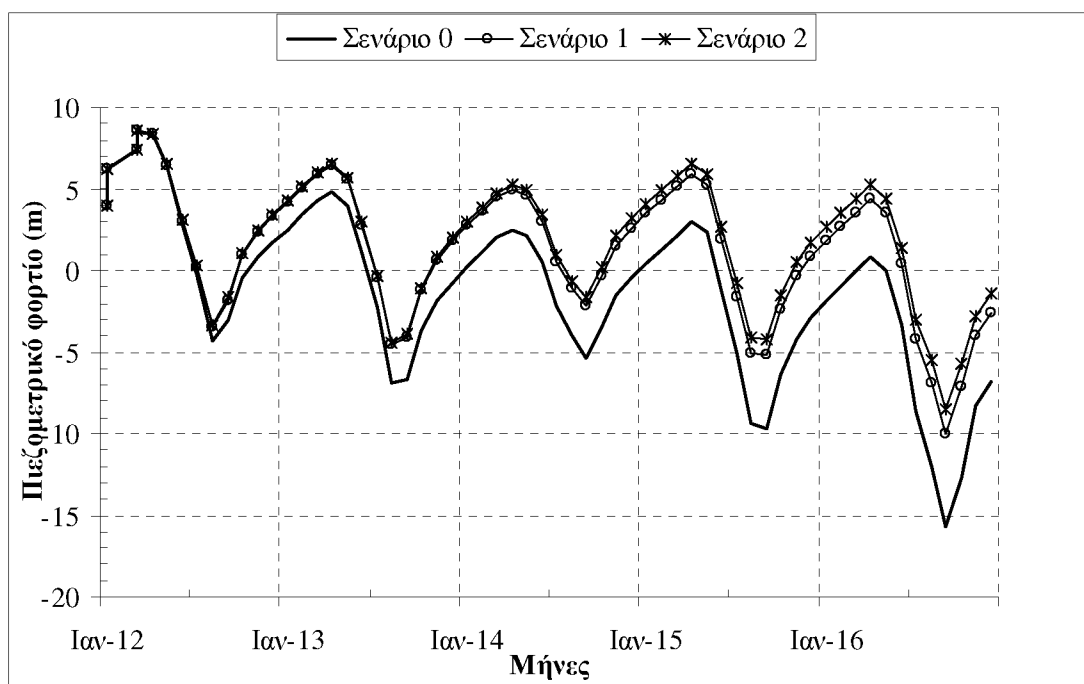
Σχήμα 4. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 3)



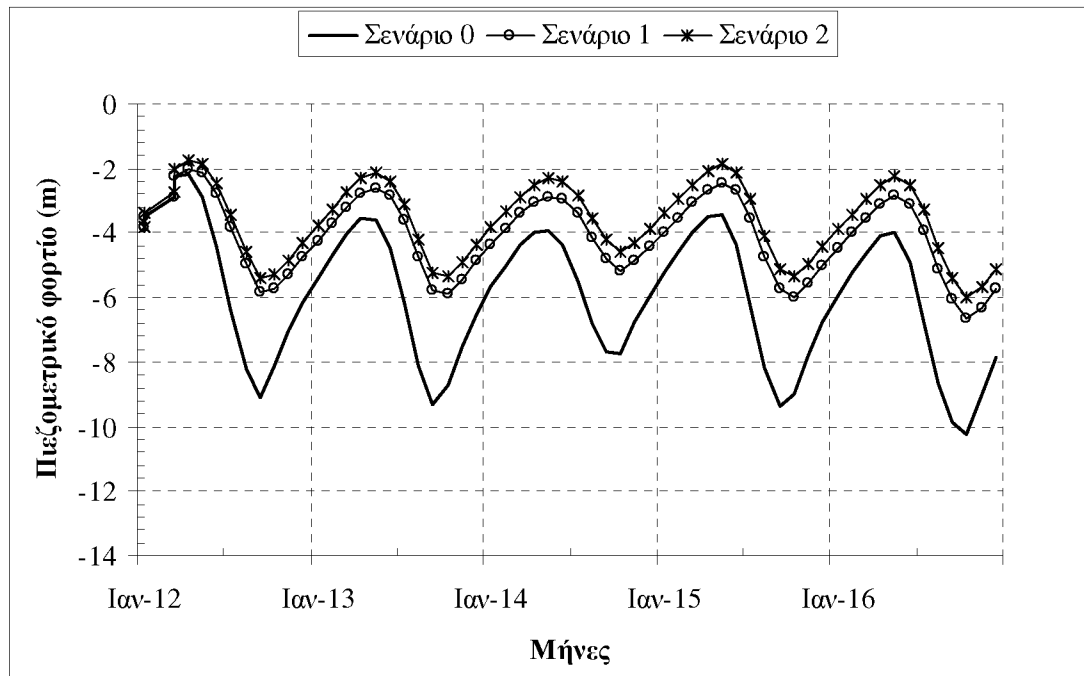
Σχήμα 5. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 4)



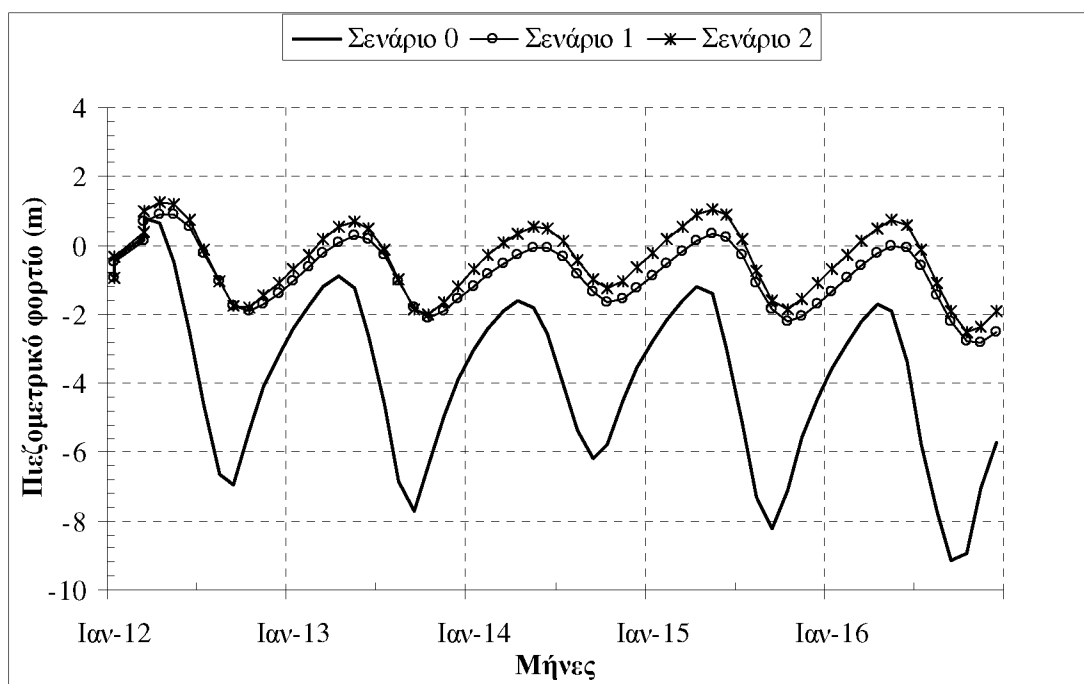
Σχήμα 6. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 5)



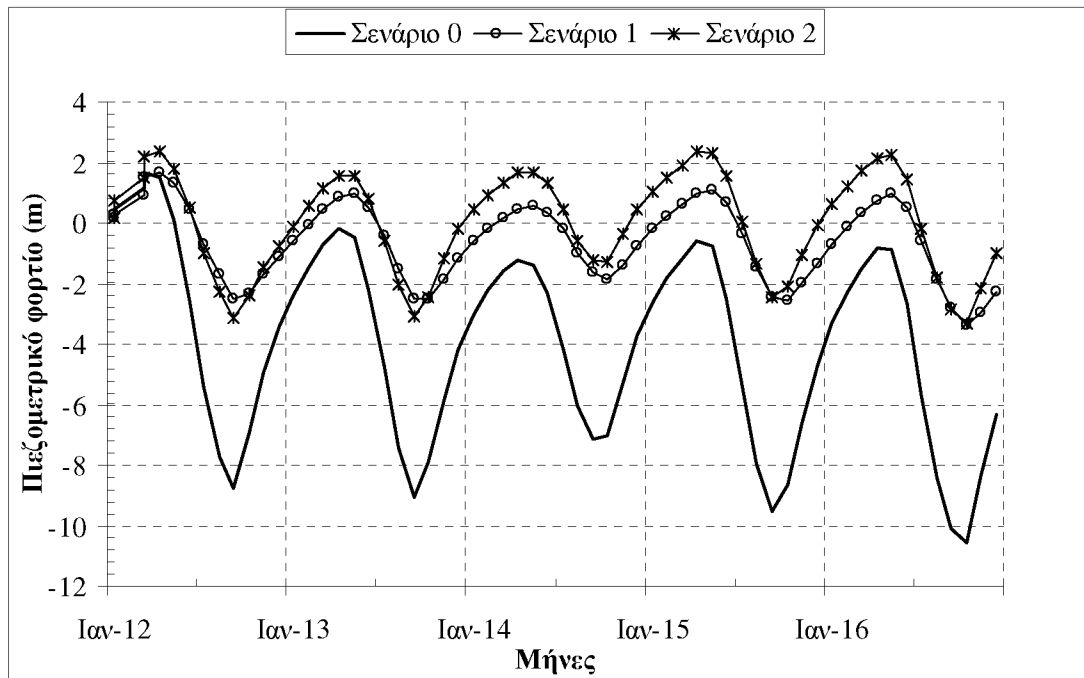
Σχήμα 7. Διακύμανση του πεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 6)



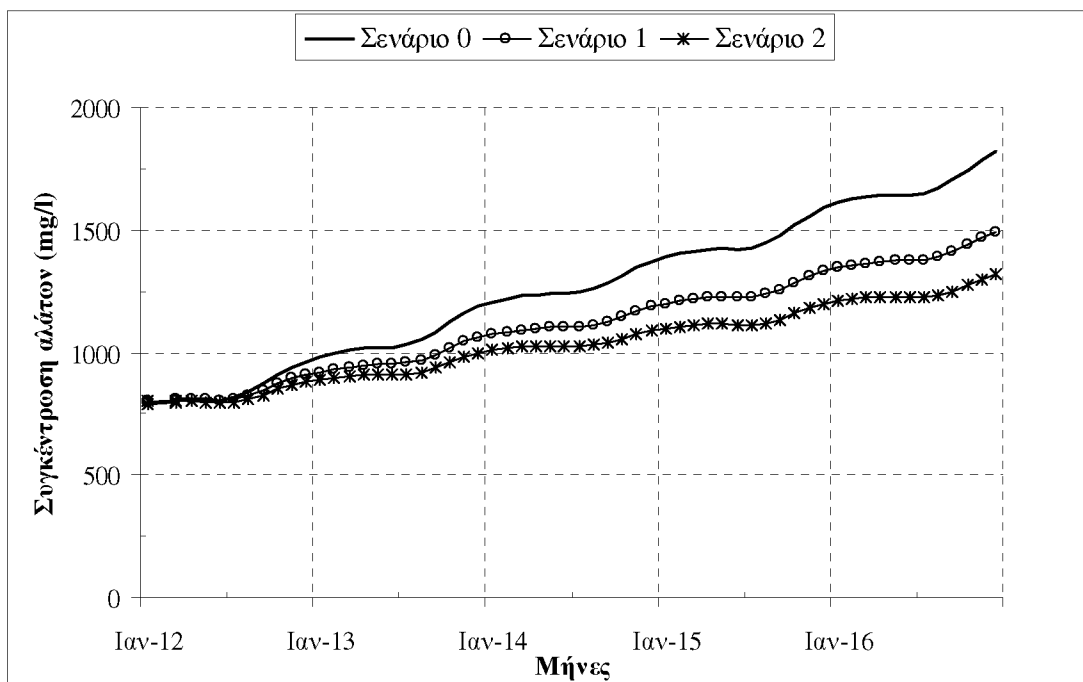
Σχήμα 8. Διακύμανση του πεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 13)



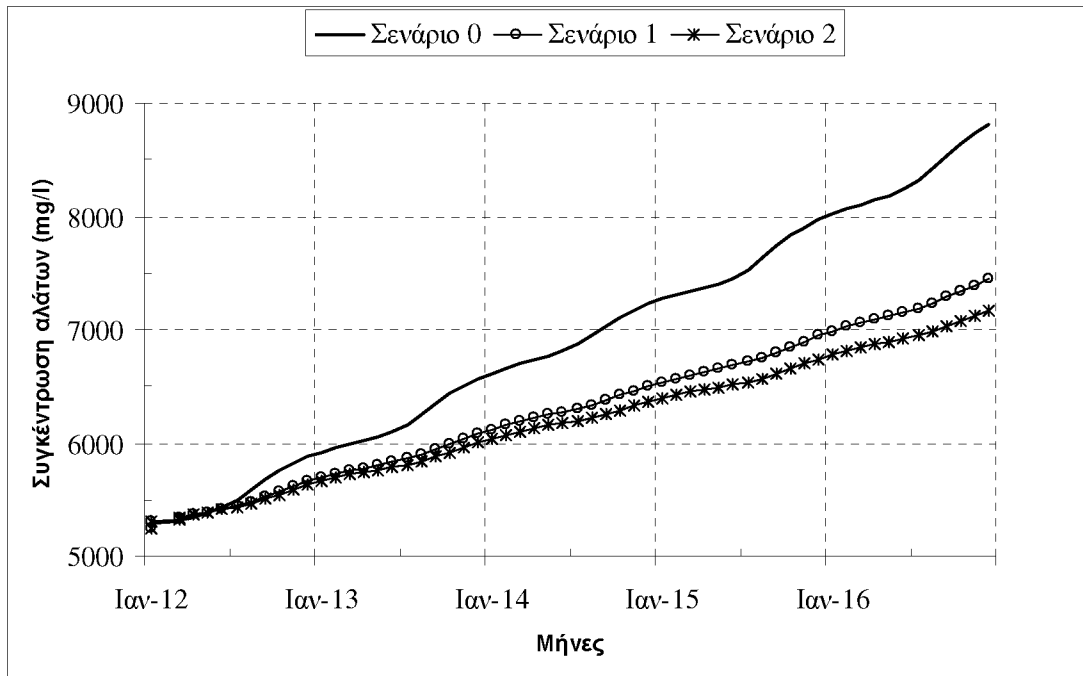
Σχήμα 9. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 14)



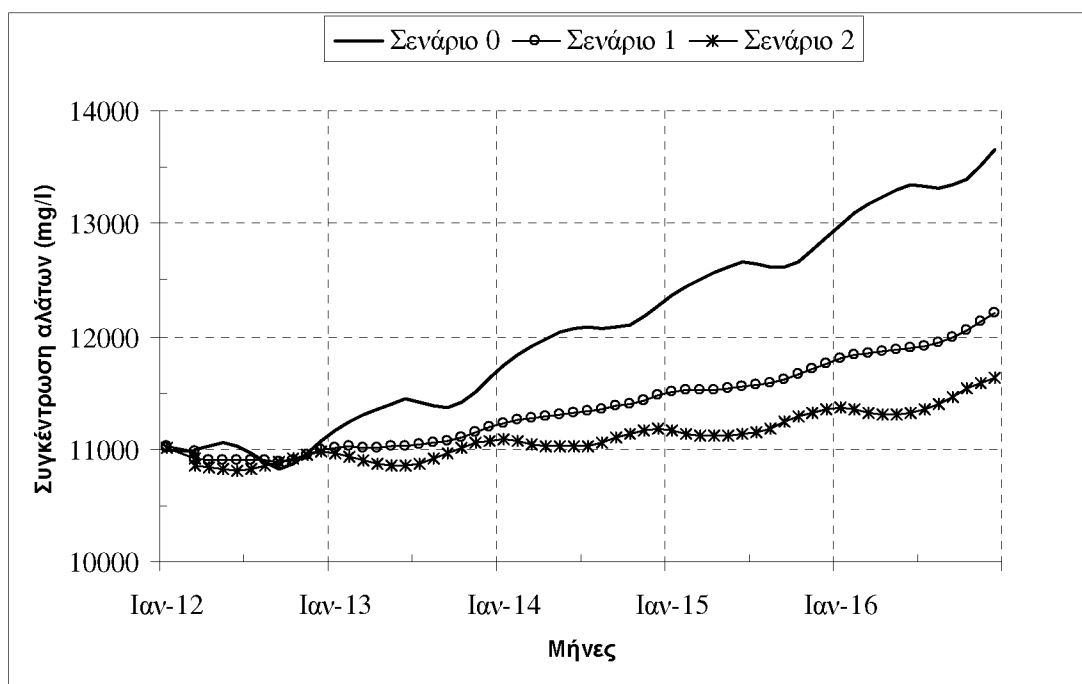
Σχήμα 10. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Σημείο 15)



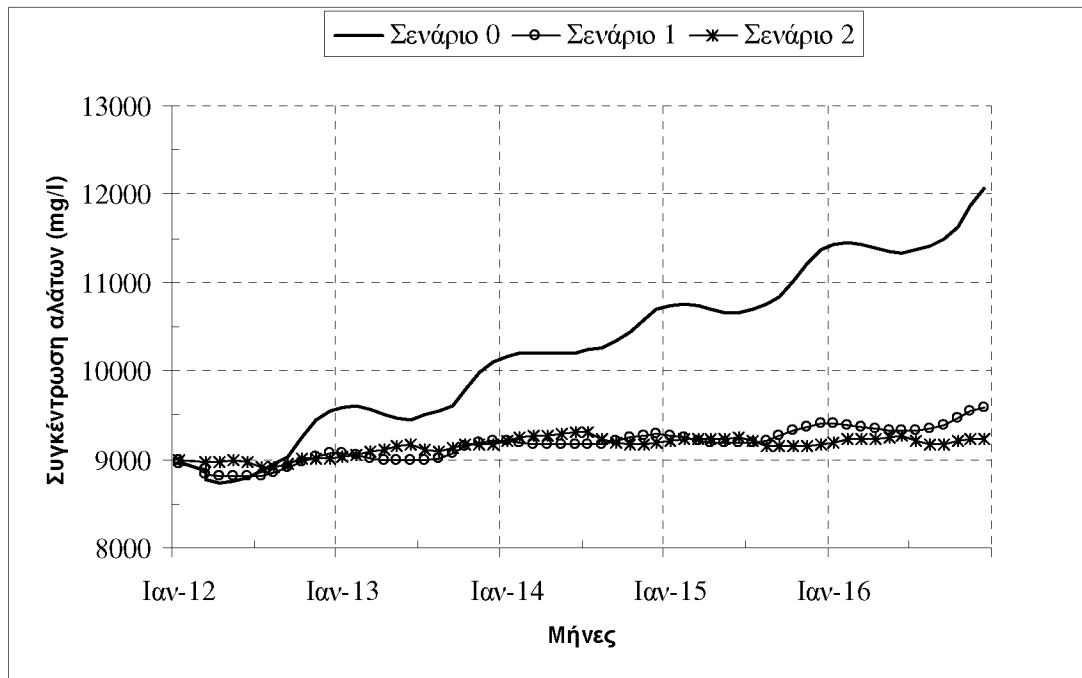
Σχήμα 11. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 1)



Σχήμα 12. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 13)



Σχήμα 13. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 14)



Σχήμα 14. Διακύμανση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (Σημείο 15)

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

- Aliewi, A.S., Mackay, R., Jayyousi, A., Nasereddin, K., Mushtaha, A. and Yaqubi, A., 2001. Numerical simulations of the movement of saltwater under skimming and scavenger pumping in the Pleistocene aquifer of Gaza and Jericho areas, Palestine. *Transport in Porous Media*, 43: 195-212.
- Bear, J., 1999. Conceptual and Mathematical Modeling. Chap. 5 in J. Bear, A. H-D. Cheng, S. Sorek, D. Quaraz, and I. Herrera (Eds.), *Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts methods and practices*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 127-162.
- Diersch, H-J. and Kolditz, O., 2002. Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, 25: 899-944.
- Diersch, H-J., 1994. Interactive, graphics-based finite element simulation system – FEFLOW – for modeling ground-water flow and contaminant transport processes. WASY, Berlin.
- Holzbecher, E., 1998. *Modeling Density-Driven Flow in Porous Media*. Springer, Berlin, 286 p.
- Oude Essink, G.H.P., 1999. Impact of sea level rise in the Netherlands. Chap. 14 in J. Bear, A. H-D. Cheng, S. Sorek, D. Quaraz, and I. Herrera (Eds.), *Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts methods and practices*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 507-530.
- Oude Essink, G.H.P., 2001. Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: a numerical study. *Transport in Porous Media*, 43: 137-158.
- Petalas, C. and Lambrakis, N., 2006. Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers - the case of the coastal aquifers of Thrace. *Journal of Hydrology* (324), 51–64.
- Petalas, C., Pisinaras, V., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V. A. and Ouzounis, K., 2009. Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece. *Desalination* (237), 22–41.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V.A. and Zagana, E., 2007. A groundwater flow model for water resources management in the Ismarida plain, North Greece. *Environmental Modeling and Assessment* (12), 75-89.
- Stakelbeek, A., 1999. Movement of brackish groundwater near a deep-well infiltration system in the Netherlands. Chap. 15 in J. Bear, A. H-D. Cheng, S. Sorek, D. Quaraz, and I. Herrera (Eds.), *Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts methods and practices*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 531-542.
- van Dam, J.C., 1999. Exploitation, Restoration and Management. Chap. 4 in J. Bear, A. H-D. Cheng, S. Sorek, D. Quaraz, and I. Herrera (Eds.), *Seawater intrusion in*

coastal aquifers – concepts methods and practices. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 73-126.

Διαμαντής, Ι., 1991. Υδρογεωλογική αναγνώριση και διερεύνηση δυνατοτήτων συνδυασμένης διαχείρισης υπόγειων και επιφανειακών νερών νομού Ροδόπης για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Τεχνική έκθεση στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενου από τη Νομαρχία Ροδόπης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 3 τεύχη, 198 σελ.

Διαμαντής, Ι., 2009. Ποιοτική αξιολόγηση του υπόγειου νερού επιλεγμένων πεδίων του νομού Ροδόπης στα σημεία προέλευσης του (γεωτρήσεις), ως προς την περιεκτικότητα σε νιτρικά, νιτρώδη και αμμωνιακές ουσίες, τα αίτια προέλευσης – προοπτικές. Ερευνητική έκθεση για λογαριασμό της Νομαρχίας Ροδόπης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 57 σελ.

ΔΠΘ, 2008. Διερεύνηση διαθέσιμων ποσοτήτων επιφανειακού νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής για την ικανοποίηση αρδευτικών και άλλων αναγκών του Νομού ροδόπης. Τρόποι διαχείρισης (φράγματα, λιμνοδεξαμενές) και περιοχές διάθεσης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 50 σελ.

Καλλιώρας, Α., 2008. Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Νομού Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη, 285 σελ.

Πεταλάς, Χ, Πλιάκας, Φ. και Διαμαντής, Ι., 2002. Η αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υπόγεια υδροφόρα συστήματα στο διεθνή χώρο και στην Ελλάδα. ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΑ, 12: 65-81.

Τερζίδης, Γ.Α. και Καραμούζης, Δ.Ν., 1985. Υδραυλική υπόγειων νερών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 352 σ.

Υπουργείο Γεωργίας, 2002. Διαχείριση υδατικών πόρων στον αγροτικό τομέα. Γεν. Δ/ση Εγγ/κών έργων και Γ.Δ., Αθήνα, 31 σ.